

Definición de la gestión energética de un vehículo híbrido basada en la simulación del funcionamiento de los componentes del sistema propulsor en las condiciones de operación de diseño

F. Jiménez Alonso, J. M. López Martínez, F. J. Sánchez Alejo,
P. Cobos Arribas

Universidad Politécnica de Madrid

INSIA. Campus Sur UPM. Carretera de Valencia km 7, 28031 Madrid

Teléfono: 91 336 53 17. Correo electrónico: felipe.jimenez@upm.es

Área Temática: Sostenibilidad y Medio Ambiente en Ingeniería Mecánica

Resumen

La tendencia actual hacia el incremento de la movilidad en las sociedades más avanzadas va en contradicción con criterios de control de la contaminación local y la explotación de los recursos de combustible. Entre las soluciones planteadas, se encuentran los vehículos híbridos. En este artículo se presenta la definición y simulación de la gestión energética de uno de estos vehículos, a partir de las condiciones de operación. El vehículo híbrido diseñado en su totalidad combina propulsión con un motor eléctrico alimentado por baterías y un motor térmico, incluyéndose, además, paneles solares, así como carga externa por red eléctrica. Se han desarrollado modelos de simulación de los componentes y su integración. Analizando el campo de aplicación del vehículo, se ha planteado un ciclo de conducción a partir de ciclos estándar. Con el modelo, se ha analizado la idoneidad de diferentes estrategias de control de la energía, considerando diversas condiciones operativas.

Palabras Clave: vehículo híbrido, modelo, ciclo de conducción, estrategia de control

Abstract

The present tendency towards mobility growth contradicts criteria of exhaust emissions control and fossil fuels exploitation criteria. Among other solutions, hybrid vehicles are one of most promising ones. In this paper, the definition and simulation of energy management of one of them is presented. The vehicle has been designed completely and combines an electric motor powered by batteries, an internal combustion engine and solar panels, apart from external electric charge. Models of the components and their integration have been developed. Analyzing the application field of the vehicle, a driving cycle has been defined. The model has been used to analyze energy management strategies, assuming different operating demands.

Keywords: hybrid vehicle, model, driving cycle, control strategy

1. Introducción

La tendencia actual hacia el incremento de la movilidad en las sociedades más avanzadas va en contradicción con los criterios de control de emisiones. La sostenibilidad del sector del transporte dependerá fuertemente de la introducción de

tecnologías que reduzcan las emisiones contaminantes y el consumo de combustibles fósiles. Recientemente se vienen planteando estrategias interrelacionadas. Entre ellas, las soluciones técnicas incluyen mejoras en los motores de combustión y las transmisiones, tratamiento de gases de escape, propulsión eléctrica o híbrida y pilas de combustible [1]. Los sistemas de propulsión híbridos se plantearon ya hace muchos años como una solución factible y eficaz para la reducción del consumo y las emisiones [2]. En este trabajo se plantea el diseño de la gestión energética de un sistema híbrido de propulsión de un vehículo especial de ámbito urbano para la ciudad de Madrid. Las decisiones se apoyan en un modelo de simulación de dicho sistema.

2. Especificaciones energéticas del vehículo

Para el vehículo desarrollado, se ha optado por la configuración híbrida en serie, a diferencia de otras aplicaciones comerciales, ya que permite un control preciso de la transferencia de potencia, pudiendo optimizarse el funcionamiento a consumos bajos o nulos si las circunstancias así los requieren, siendo, además, la configuración óptima para circulación urbana con trayectos cortos con paradas, donde los requerimientos de potencia no son excesivos. Esta configuración implica la siguiente gestión energética:

- La principal fuente de almacenamiento de la energía eléctrica son las baterías de potencia (alta tensión), que alimentan al motor eléctrico.
- El motor de encendido provocado acciona el generador eléctrico. Esta energía se reparte entre el motor eléctrico y la recarga de las baterías.
- Las baterías también son recargadas al recuperar el motor eléctrico energía durante las frenadas (frenada regenerativa).

Además, las especificaciones del cliente hacen referencia a otros aspectos de la gestión energética tales como:

- Posibilidad de carga externa de las baterías desde la red eléctrica de 220 V
- Unos paneles solares deben dar energía al circuito de baja cuando el vehículo está en marcha o a las baterías de potencia cuando el vehículo está parado.
- El conductor debe poder controlar aspectos de la gestión del sistema propulsor como la frenada regenerativa o la deshabilitación del motor térmico.

La gestión energética se lleva a cabo desde una unidad de control central que, en base a las demandas de potencia, las entradas del conductor y el estado de carga de las baterías, decide cuándo debe arrancar el motor térmico y en qué punto de funcionamiento.

3. Modelo de simulación

Aunque el estudio preliminar de las condiciones usuales de funcionamiento permite una primera estimación de los componentes del vehículo, el ajuste de la gestión energética programada en la unidad central, optimizando el consumo para las condiciones operativas más frecuentes del vehículo, obliga a emplear técnicas que proporcionen una mayor precisión. En este sentido, los modelos matemáticos de sistemas de propulsión híbrida son múltiples [3-8]. Además, existen técnicas avanzadas para la selección del sistema propulsor de un vehículo híbrido, la definición de la estrategia de control de la energía y el estudio de sensibilidad de diferentes soluciones [9-13]. Sin embargo, la configuración peculiar del vehículo diseñado, dotado de paneles solares además de la estructura híbrida en serie, la necesidad de establecer estrategias de control que cumpliesen con las especificaciones prefijadas en cuanto a gestión energética, y el requerimiento de simular el funcionamiento en base a variables que son medidas en la realización material del prototipo, justifican el desarrollo de un modelo específico. El modelo de simulación completo ha sido programado en Matlab/Simulink (figura 1).

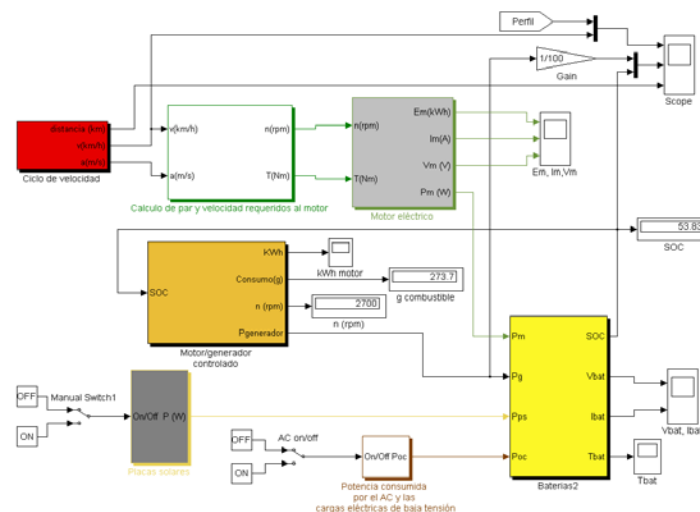


Figura 1. Modelo en Matlab/Simulink de la configuración híbrida en serie

El modelo refleja las distintas partes de las que se compone el vehículo y está dividido en los siguientes módulos:

- Módulo del grupo motor-generator (figura 2).

El modelo del motor está formado por submodelos que incluyen la admisión de aire, la inyección de combustible, la mezcla aire-gasolina, la combustión, el EGR y el VPD. A su vez, la consigna de control del motor debe permitir trabajar a éste en su punto óptimo.

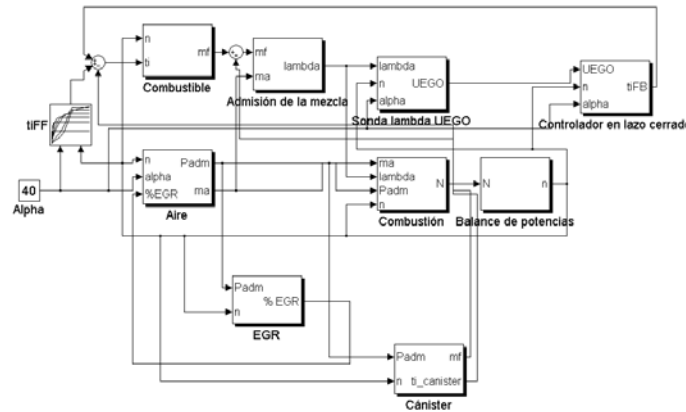


Figura 2. Modelo de motor térmico

- Módulo de baterías de potencia

Las baterías, como elementos de almacenamiento electroquímico, presentan muchas incertidumbres en la evaluación de su comportamiento y una apreciable variabilidad ante modificaciones de diversos parámetros [14,15]. Los fenómenos de histéresis, la variación de capacidad que presentan con la temperatura, las variaciones en su vida útil con la profundidad de descarga, etc. son de muy difícil evaluación. Existen numerosos intentos de modelización del comportamiento de las baterías [16-18]. Resulta muy importante la evaluación del estado de carga, para lo que se realiza un balance de potencias para calcular la potencia que deben suministrar o recibir las baterías:

$$SOC_2 = SOC_1 - \frac{\int_0^t I \cdot dt}{C_n} \quad (1)$$

donde C_n es la capacidad de la batería según la tasa descarga. La capacidad se calcula con la ecuación de Peukert, $I^n \times t = C$, donde C es un coeficiente de ajuste y n el exponente de Peukert. Además, se incluye un modelo térmico para estimar las variaciones de temperatura del bloque de baterías.

- Módulo de motor eléctrico

El motor eléctrico se modela mediante el uso de sus curvas características, dado que el empleo de un modelo basado en el circuito equivalente precisa datos, en general, desconocidos. El modelo permite simular también el comportamiento del motor cuando actúa como generador en procesos de frenada regenerativa.

- Sistema de baja tensión y paneles solares

Estos componentes se modelan mediante constantes, incluyendo la carga del aire acondicionado, cuyo accionamiento es crítico en la gestión óptima de la energía.

4. Resultados de las simulaciones

El modelo anteriormente descrito permite evaluar el funcionamiento de los subsistemas del vehículo y concretar la estrategia de control más eficaz, compatible con las especificaciones. Según éstas, los ciclos de conducción usuales no son representativos del funcionamiento real de este vehículo. Por ello, se ha definido un nuevo ciclo, basado en el ciclo Europa, pero modificado por las prestaciones demandadas. La figura 3 muestra el ciclo de velocidades de entrada (parte superior) y la salida en cuanto a estado de carga de las baterías y potencia suministrada por el motor térmico (figura inferior) para una de las simulaciones realizadas.

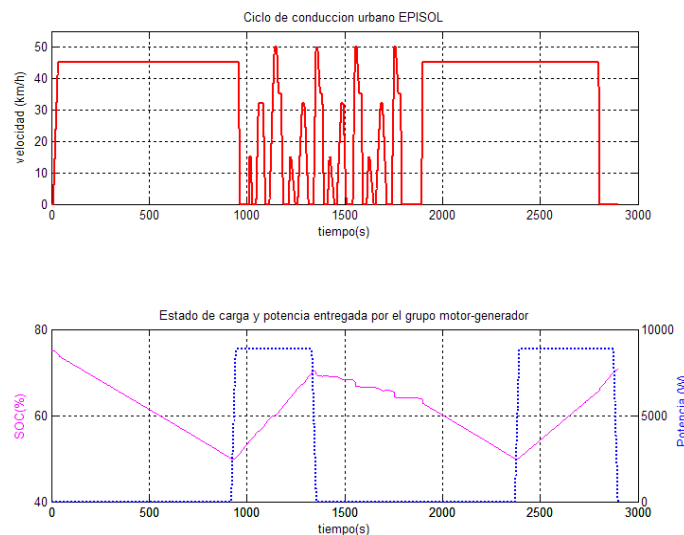


Figura 3. Entrada al modelo de simulación (imagen superior) y salida de estado de carga y funcionamiento del motor térmico (imagen inferior)

Debe hacerse notar que los resultados son muy sensibles al estado inicial de carga y al rango de carga en el que se permiten las oscilaciones de la carga de las baterías. Con las conclusiones obtenidas se ha definido la estrategia de control que debe ser programada en el controlador a partir de 5 estados básicos y distinguiendo dos puntos de funcionamiento del motor térmico en función de la carga de baterías y la activación del aire acondicionado (figura 4).

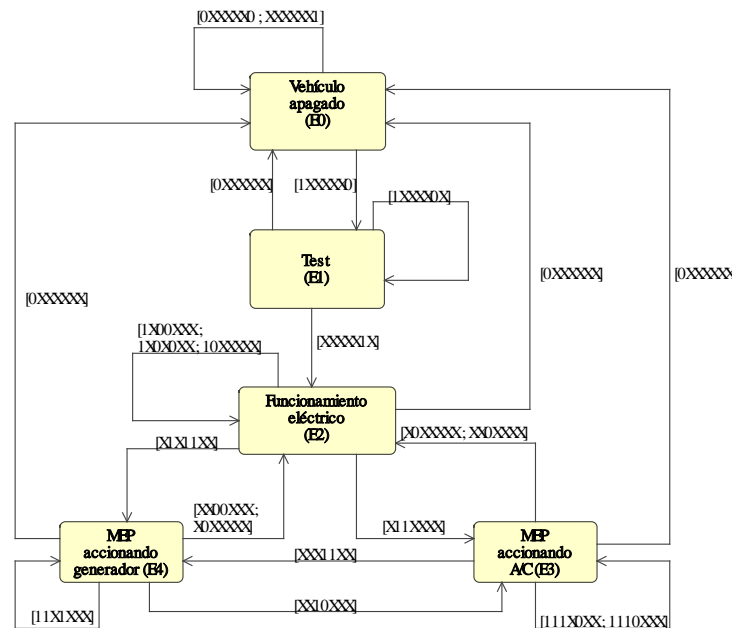


Figura 4. Diagrama de estados del sistema de control energético

5. Conclusiones

En el presente artículo, se ha descrito un modelo de simulación del sistema propulsor de un vehículo híbrido diseñado según las especificaciones marcadas por el cliente para una aplicación concreta. Los submodelos de cada componente han sido desarrollados atendiendo a un compromiso entre complejidad y precisión en cada uno de ellos, siendo conscientes de la necesidad de estimar numerosos parámetros a través de ensayos.

Los resultados de las simulaciones con el modelo, sobre un ciclo de funcionamiento específicamente diseñado en base al uso del vehículo, han apoyado decisiones de diseño y han permitido la definición de la estrategia de control que debe ser programada y que proporciona consumos óptimos en el rango de operación definido.

6. Referencias

- [1]. P. Gott, J.-R. Linna y J. P. Mello. “The evolution of powertrain technology 2008 and beyond: engines, hybrids, battery electric, fuel cells and transmissions”. Proceedings of FISITA 2004 Congress. Barcelona, (2004).
- [2]. L. E. Unnerwehr, J. E. Auiler, L. R. Foote, D. F. Moyer y H. L. Stadler. “Hybrid vehicle for fuel economy”. SAE paper nº 760121. (1976)
- [3]. B.K. Powell y T.E. Pilutti. “A range extender hybrid electric vehicle dynamic model”, Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control 12 (1994) 2736–2750.
- [4]. K. E. BAILEY y B. K. POWELL. “A hybrid electric vehicle powertrain dynamic model”. Proceedings of the 1995 American Control Conference, pp 1677-1682, (1995)
- [5]. G.A. Hubbard y K. Youcef-Toumi. “Modelling and simulation of a hybrid-electric vehicle drivetrain”, Proceedings of the 1997 American Control Conference 636–640. (1997)
- [6]. J.N. Harb, V.H. Johnson y D. Rausen, “Use of a fundamentally based lead-acid battery model in hybrid vehicle simulations”. Tutorials in Electrochemical Engineering – Mathematical Modelling 14 (1999) 163–177.
- [7]. A. Rousseau. “Simulation and Validation of Hybrid Electric Vehicles”, ADVISOR Users Conference, Costa Mesa, California, (2000).
- [8]. K. Butler, K. Stevens, y M. Ehsani, “A versatile computer simulation tool for design and analysis of electric and hybrid drive trains”, SAE Paper No. 970199. (1997)
- [9]. X. Wei, V. Utkin, y G. Rizzoni. “Sliding optimal control in hybrid electric vehicle energy management optimizations”. Proceedings of FISITA 2004 Congress. Barcelona (2004).
- [10]. Z. Filipi, L. Louca, B. Daran, C.-C. Lin, U. Yildir, B. Wu, M. Kokkolaras, D. Assanis, H. Peng, P. Papalambros, J. Stein, D. Szkubiel y R. Chapp. “Combined optimisation of design and power management of the hydraulic hybrid propulsion system for the 6 × 6 medium truck”. Int. J. of Heavy Vehicle Systems, Vol. 11, nº 3/4, (2004)

- [11]. C. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis y J. Stein. “Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies”, SAE Paper 2001-01-1334, (2001)
- [12]. Z. Han, Z. Yuan, T. Guangyu, C. Quanshi y C. Yaobin. “Optimal energy management strategy for hybrid electric vehicles”. SAE paper n° 2004-01-0576, (2004)
- [13]. H.-J. Yoon y S.-J. Lee. “An optimized control strategy for parallel hybrid electric vehicle”. SAE paper n° 2003-01-1329, (2003)
- [14]. F. Trinidad, C. Gimeno, J. Gutiérrez, R. Ruiz, J. Sainz y J. Valenciano. “The VRLA modular wound design for 42 V mild hybrid systems”. Journal of Power Sources 116 (2003), pp 128–140
- [15]. M. S. Salameh, M. A. Casacca, y W. A. Lynch, “A mathematical model for lead-acid batteries”. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol 7, n° 1, (1992), pp. 93–97.
- [16]. J. Van Mierlo, P. van den Bossche y G. Maggetto. “Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators”. Journal of Power Sources 128, (2004), pp 76-89
- [17]. M. Ceraolo. “New dynamical model of lead-acid batteries”, IEEE Trans. Power Systems 15 (2000) 1184–1190.
- [18]. J.J. Esperilla, J. Félez, G. Romero y A. Carretero. “A model for simulating a lead-acid battery using bond graphs”. Simulation Modelling Practice and Theory 15 (2007) 82–97

7. Agradecimientos

El diseño y construcción del vehículo híbrido objeto del presente artículo ha sido parcialmente financiado por CEMUSA y el Ministerio de Medio Ambiente, a quienes los autores quieren manifestar su agradecimiento. Los autores quieren también agradecer la participación en el proyecto del Instituto de Automática Industrial del CSIC.